

普里兹湾及邻近海区水团和环流研究述评

REVIEW OF THE STUDY OF WATER MASS AND CIRCULATION IN PRYDZ BAY AND ITS ADZACENT SEA

乐肯堂

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

普里兹湾是南极大陆周围仅次于威德尔海和罗斯海的最大海湾,位于印度洋扇形区。自1957年的国际地球物理年以来,同在南大洋其他海区一样,在该海区开展了多次国际联合考察。我国自1989年起对普里兹湾区海洋学问题已连续进行了4次考察,取得了若干资料。

在普里兹湾陆架上,早期的观测结果^[17,27],认为表层水异常温暖和深层水异常冷。1967年,在前苏联“O6b”号的第12次南大洋考察中,制定了普里兹湾区的专题调查计划,以便解决上述问题。这次对普里兹湾考察的结果表明,表层的热盐结构类似于前几次考察(Grigorgev, 1970)。在“O6b”号的第14次考察(1969年2月)中,发现普里兹湾大多数观测站的表面水温均高于0°C,且在Amery冰架外发现了一个相对温暖的区域,其位置比以前发现的区域更偏东^[21,30]。最冷的水位于西冰架(The West Ice Shelf)以西。在Amery冰架外,有一个孤立的高盐区,它离上述暖水区以东一段距离。此后,“Зубов号”1973年2月到达普里兹湾时发现那里严重封冻,与早期考察结果相比,湾内大部分区域的水温明显偏低;同时还发现,整个湾内存在非常深的对流区,并且没有迹象表明湾外的海水侵入湾内。

进入80年代以来,由于在现场考察中采用了CTD

和浮标测流系统,加上卫星遥感,使人们对普里兹湾的海洋过程的认识有了长足的进步。在本文中,将对该海区水团和环流研究取得的成果作一简要述评。

1 水团

普里兹湾位于极锋带(The Polar Front Zone)以南。根据Deacon(1937)的分类,本区的大洋部分可划分为三个水团,即南极表层水(Antarctic Surface Water),绕极深层水(Circumpolar Deep Water, CDW)和南极底层水(Antarctic Bottom Water, AABW)。在陆架上,还有陆架水和冰架水(Ice Shelf Water, ISW)。

1.1 表层水

根据Mosby^[23]的研究,在南大洋,南极表层水由于季节变化可以再分为夏季表层水(Summer Surface Water)和南极冬季水(WW)。

夏季,表层水位于季节跃层之上,其示性特征为盐度相对低而变动范围大($32.50 < S < 34.56$),是由于夏季升温使海冰融化而形成的,在 $T-S$ 图解上没有明确的核心区。在陆架上,海面水温通常高于有流冰的区域,这

收稿日期 1994年1月24日

种情况同罗斯海类似。在普里兹湾外,表层水的厚度向北增加。在陆架上,表层水的厚度随深度而变可达到约30m。事实上,夏季的表层水是一种过渡性质的水团,因而其温盐特性具有显著的年际变化^①。

1981年澳大利亚的“M. V. Nella Dan”号调查船的观测表明,本区的表层温盐结构取决于局地海面条件,且其中有一个测站(44DN)显示,极低的水温几乎从上到下均匀分布, -1.8°C 的等温线从表层穿过盐跃层(其深度为20~50m)直达海底。目前尚不清楚的是这种表层热盐结构所形成的机制。但盐跃层的存在表明,仅由当地海冰生长所生成的对流可能不足以侵消该盐跃层,并且也不能用于解释深水等温层的存在。这种现象很可能是由于水平平流和当地冰架的存在导致的。

表层水温分布的另一个特征是在湾内的若干测站中发现存在季节性温跃层, Amery 冰架附近的温跃层是一个相当典型的例子。在威德尔海的 Filshener 冰架附近和 Ross 冰架外的表层中也发现有类似的温跃层。但正如 Денисов и Мызньникова^[29]的研究结果所表明的,这些温跃层具有显著的年际变化。

Smith *et al.*^[25]发现,最冷的表层水出现在西冰架附近和 Amery 冰架正北。值得注意的是,在 Amery 冰架的正北,却有一块较暖的水舌向南楔入。

夏季表层水中存在着混合层是一个令人感兴趣的特征,这是由于风力的搅拌作用而形成的。在冬季,则由于结冰而使盐份析出造成强烈的盐对流。

按照水团分类,在夏季表层水之下应为绕极深层水(CDW)。事实上,在夏季表层水与绕极深层水之间还存在着温度极小层。据认为它是冬季对流的残存水^[23],并被称为南极冬季水。可以推断,在冬季,南极表层水均为南极冬季水所占据,该水团的特征指标为水温低于 -1.5°C , 盐度界于 $34.2\sim 34.56$ 之间,其核心部分的平均深度约为 100m ^②。在陆架上,冬季对流可以达到深得多的深度,且温度最小值位于深的近底水中。

1.2 陆架水

关于陆架水的示性指标,现在尚有不同的看法。Smith *et al.*^[25]按照 Carmack^[3]的分析把陆架水分成两类:高盐陆架水和低盐陆架水。其温度指标为:接近 -18°C , 而其盐度指标则分别为 >34.50 和 <34.25 。但 Middleton and Humphries^[22]对 1982~1985 年的考察资料分析表明,陆架水的温盐特征指标为 $T < -1.5^{\circ}\text{C}$, $S > 34.56$, 这就是说,他们并没有发现低盐陆架水。在这一点上,作者的分析结果^[1]与他们有相似之处,因此,高盐陆架水的盐度指标似取 $S > 34.50$ 为宜。由此表明,陆架水的特性具有显著的年际变化。

1995年第2期

与威德尔海和罗斯海相比较,普里兹湾体积小且陆架窄,这可能是产生湾内高盐陆架水的重要原因。

1.3 绕极深层水

绕极深层水是普里兹湾区中体积最大的水团, Carmack 分析表明^[3],它的体积占印度洋区水体体积的 55%,其特征指标为: $0.5^{\circ}\text{C} \leq T \leq 2^{\circ}\text{C}$, $34.50 \leq S \leq 34.75$ ^②,其核心部分的特征来自作为变性高温高盐亚极带深渊水的源地。Gordon^[10,11]利用水温最大值和盐度最大值作为指标把绕极深层水分为上、下两层。Callahan^[2]指出,北大西洋深层水转变为绕极深层水经历了沿着等密度面的复杂的交换和变性。Smith *et al.*^[25]利用水温最大值作指标分析了 1981 年考察资料,结果表明上深层水的界限非常清晰,但用最大盐度值作指标却不能清楚地分辨出下深层水。

Foster and Carmack^[7]认为,在南极底层水形成过程中,绕极深层水能否上升并扩展到陆架上是一个关键因素。这后一过程还可能对浮冰的解冻起作用。Carmack^[3]把变性暖深层水(Modified Warm Deep Water)鉴别为在印度洋陆架区中的重要水体,体积占印度洋水体的 17%。但 Smith *et al.* 的分析表明^[25],在 1981 年的资料中没有显示出深层水扩展到普里兹湾区陆架上的证据。不过 Middleton and Humphries 的分析表明^[22],在 1982 年 11~12 月,在普里兹湾的陆架外缘观测到的一种混合水(他们称之为普里兹湾底层水, Prydy Bay Bottom Water, PBBW),其特性介于陆架水与暖深层水之间。他们认为,这种水是陆架水与暖深层水的混合水。如果他们的推测获得证实,那么不难推断,绕极深层水便有可能扩展到普里兹湾的陆架上。

1.4 底层水

南极底层水的形成问题是南大洋研究中人们最为关注的基本课题之一。一般认为,其特征指标为 $T < 0^{\circ}\text{C}$, $34.6 \leq S \leq 34.72$ ^[3,12]。Deacon(1937)提出,低温的陆架水与高盐的绕极深层水的混合,形成一种密度较高的水团,这种水团沿着大陆坡向下流动,在此过程中消散到各大洋的深渊层中。长期以来,人们把威德尔海作为南极底层水的主要来源。Gordon 推测罗斯海是南极底层水的可能源地^[9]。这一推测接着就被 Jacobs *et al.* 所证实^[8]。他们的分析指出了陆架上底层水的形成过程,由此获得了南极底层水的较高盐的变种。而 Gordon and

① 乐肯堂、史久新,1994a。普里兹湾区热盐结构的分析,南极研究(中文版),已送审。

② Smith *et al.* (1984) 把绕极深层水的特征指标确定为 $0 \leq T \leq 2^{\circ}\text{C}$, $34.50 \leq S \leq 34.75$ 。

Tchernia 探测到了来自 Adelie 海岸的低盐变种^[13]。Carmack and Killworth 发现^[5], 威尔克斯地海岸外的下沉的陆架水可以与暖深层水混合而形成一个与深渊水发生互侵作用的异常的水团, 这可能对南极底层水的形成作出间接贡献。Jacobs and Georgi 推断^[19], 在恩德比地外 60°E 处可能产生南极底层水。

对于普里兹湾海域, 从 1981 年 2 月“M. V. Nella Dan 号”资料所给出的 $T-S$ 图解上不能获得清晰的底层水水团。然而, 对较深层的水样分析表明, 其中包含了南极底层水作为主要成分的低温高盐水团。这种冷水在 62°E 处向下渗透到大陆坡上。这种情况类似于 Jacobs and Georgi^[19]在 60°E 附近所描述的情况。因此 Smith *et al.* 认为^[25], 在普里兹湾区中所发现的南极底层水之主要部分来源于威德尔海和罗斯海。此后, Middleton and Humphries^[22]对此问题作了进一步分析。他们发现, 在 1982 年 11~12 月的 T, S 资料中陆架水的 S 值大于 34.56。在这种情况下顺着陆坡的深水对流可以形成深水互侵层(Deep interleaved layers)。实测的陆架水之盐度有时大于 34.62, 这确实表明陆架水的密度足够大而使它能顺着陆坡流动到达邻近的绕极深层水之下而形成真正的南极底层水, 但在邻接普里兹湾的陆架外, 没有迹象表明存在着直接顺着大陆坡的流动。他们认为, 这种情况的出现主要是在南极大陆沿岸存在着东风, 它驱使大陆架水沿岸向西运动。因而像在威德尔海那样, 在近似地转平衡的沿岸流中, 将有一支微小的顺陆坡方向的地转分量(Foster *et al.*)^[8]。据此, Middleton and Humphries 认为^[22], 他们提出的普里兹湾底层水的形成过程如下: 在东风的作用下, 使普里兹湾较宽陆架上的陆架水向西运动, 由于陆架宽度向西变窄且陆架水的密度大于其下的绕极深层水, 故向陆架外缘运动的陆架水必然获得一个向下的顺坡分量, 使其与绕极深层水混合, 于是就形成了普里兹湾底层水。目前, 尽管由于缺乏跟随从普里兹湾流出的流动路径作考察的资料, 而且由于在 1984 年和 1985 年的考察中没有进一步证实上述的混合过程, 但通过我们对 1989~1990 年和 1990~1991“极地号”两个航次的普里兹湾区的考察资料分析, 发现他们提出的混合过程是有可能出现的。不过值得注意的是, 这种混合过程只有在一定条件下才能出现, 故必须积累更多的资料以研究其年际变化。

1.5 冰架水

冰架水(Ice Shelf Waters, ISW)是南极独有的一种陆架水。其标志是在 1 大气压下其水温低于结冰温度。由于冰架水在冰架底部处冷却, 因而它具有不同寻常的特性, 因为结冰温度随着压力的增加而降低(约 0.00076

$^{\circ}\text{C bar}^{-1}$), 且已经观测到冰架水之水温可以低至 -2.4°C 。由于冷水具有相对高的可压缩性, 并且垂直运动可以导致深层中冰针(Frazil ice)的形成, 因此冰架水很重要。目前, 对于威德尔海和罗斯海的冰架水已有较多的观测和研究。

Carmack and Foster 提出^[4], 在 Filschner 冰架附近的冰架水形成于其西部的陆架水进入后与该冰架底部相接触的过程中。Jacobs *et al.* 发现^[20], 在罗斯冰架底部附近的广大区域中, 水温均在冰点附近, 他们认为在该冰架下存在着一个大尺度的环流, 这样深层水源地的暖水就可以渗透进来, 从而把热量供给该冰架底部使冰融化。

Smith *et al.* 认为^[25], 在普里兹湾中的 Amery 冰架下存在着一种高盐低温的冰架水, 它形成于该冰架之下热量的消耗和盐份的析出。但普里兹湾的特定的地形限制了冰架水与其外部开阔海洋之间的相互交换, 但它却通过滞留在湾内的深层水增强了上述效应。

由于目前尚缺乏在普里兹湾区中对于冰架之下海水特征的直接测量, 故为了研究该区的热力学和动力学, 在最近的将来设法用 CTD 直接测量冰架之下的海水特性, 很有必要。

2 环流

由于本海区的自然条件严峻, 迄今关于本区环流的研究, 多数基于动力高度计算的结果。80 年代以来, 除了利用卫星遥感资料^[26]分析环流外, 还通过漂移浮标来研究环流^[1]。

2.1 陆架环流

对普里兹湾的系统调查始于前苏联“Oob”号 1967 年的考察。该次考察在湾内设置了 38 个水文站。对上述资料所作的分析表明, 有一支来自西冰架区的寒流流入普里兹湾的东南, 但没有任何证据表明有暖的深层水上升到陆架上^[29]。据此, Smith *et al.* 假设该支寒流源自冰架外的表层水中, 但其中部分水可以来自 Shackleton 冰架和西冰架之间的陆架^[25]。目前尚未确证由于 Челюскинцы 冰舌(Chelyuskintsy Ice Tongue)的瓦解^[24]而使该区的海洋学状态(Oceanographic regime)有了变化, 但可以认为在这种情况下西冰架以东的陆架水已易于进入普里兹湾。

Grigor'yev^[14], Саватогин и Комова^[30]和 Smith *et al.*^[25]均报道了湾内有一个封闭的气旋式流涡, 其中心在深层水之上。Grigor'yev 报道了在四女士浅滩(Four ladies Bank)附近主流涡西北有一个小的气旋式流涡^[14]。但从 Middleton and Humphries 的研究结果可以发现^[22],

普里兹湾内这个主要的气旋式流涡有显著的年际变化。

Carmack and Foster 曾指出南极沿岸流 (Antarctic Coastal Current) 的第二个分支是 Filschner Depression 的顺时针流涡的输送者^[4]。Smith *et al.* 认为来自西冰架的那支流起着类似的作用,它是普里兹湾流涡的输送者^[26]。Middleton and Humphries^[22]的研究则表明,从东边进入普里兹湾的流是散开的,而从西边流出普里兹湾的流则是一支狭窄而较强的流动。他们认为,这支沿着等深线流动的海流遵循着位涡度守恒定理,而这一西向流则是与沿岸的东风的风应力分布相一致的。我们的计算表明^①湾内的气旋式流涡是不稳定的,它相当于不稳定的东风之变化。

2.2 深水区环流

在普里兹湾区的大陆架以北,主要流动是由盛行西风所驱动,与南极绕极流一起向东运动。在最大西风带之南,有一条低压带环绕南极大陆,这是环绕这一纬度的从西向东许多低压的残迹^[6,16]。在这条带之南,盛行风是向西的,结果在表层中形成了一条辐散带,因此在陆架以北的深水区中,流动势必向西^[25],但是沿岸区的流动很不稳定,除了有向西的风生流动外,时而又出现向东的流动(Middleton^[22])。

值得注意的是辐散带附近的流动。在 63°S 以北是一支宽阔的东向流,而在辐散带与大陆隆起之间则是一支继续的西向流(Smith *et al.*^[25])。现在的问题是:这种型的水平环流是由什么因素造成的?

Zverev 认为,这一区域的环流是由许多中心位于辐散带的许多大流涡构成的,而不是一支连续的西向漂流^[28]。

Jacobs and Georgi 通过地转计算发现,在恩德比地西部近岸有一支西向流,而在恩德比地东部海岸附近则有一支向东的斜压流动^[19]。他们认为,这归因于当南极绕极流遇到 Kerguelen 高原时产生的辐聚现象。

Smith *et al.* 认为^[25],这一分离现象是从莫森站外的海岸开始的,但近底流和风生正压流的加入可以使上述环流形式有相当大的改变。

Middleton and Humphries 认为^[22],在普里兹湾中,陆架水在近岸东风的作用下向西运动,在普里兹湾以西形成一支具有准地转平衡的沿岸流,这支沿岸流在陆架外缘有一个顺坡向下的分量,这一推断获得了 1985 年在普里兹湾内布设的 3 个浮标站资料^[15]的支持,尤其是莫森站附近的 4 号浮标资料证实,该处接近冰冻的冷水有一个向海底运动的较大的顺坡分量。我们的研究^[1,2]显示,由于陆架水与暖深层水在 400~600m 处混合后产生增密现象,增密后的混合水由于密度大于其下

层的密度而使混合水下沉,从而产生了上述的向海底运动的顺坡流速分量。今后要搞清楚的问题是:(1)这一下滑的混合增密水能达到多大的深度;(2)这种向海底运动的顺坡分量是否能持续存在;(3)普里兹湾陆架水的运动(或陆架环流)是否为这一下沉运动的基本动力。

3 展望

与威德尔海和罗斯海相比,迄今对普里兹湾海水热盐变化过程和环流结构的了解仍很少。这是因为在南大洋的印度洋扇形区,海洋考察资料比大西洋扇形区和太平洋扇形区少得多。目前世界上的主要海洋国家正在执行“世界大洋环流实验”(WOCE)和“全球海洋通量联合研究”(JGOFS)两个世界海洋学前沿研究计划。鉴于南大洋在这两项计划中都属于研究的关键区域之一,因此,可以期望,在完成这两项研究计划后,对于南大洋印度洋扇形区的物理海洋过程及其对全球气候的影响将会有更多的了解。

参考文献

- [1] Allison, 1985. Determining the Oceanic Forcing on Sea Ice. Contribution to the First Meeting of the JSC Working Group on Sea-Ice and Climate, Munich, F. R. G. 14.
- [2] Callahan J. E., 1972. *Deep-Sea Research* 19: 563-575.
- [3] Carmack E. C., 1977. *Deep-Sea Research Supplement*. 24: 15-41.
- [4] Carmack, E. C. and T. D. Foster, 1975. *Deep-Sea Res.* 25: 357-369.
- [5] Carmack E. C. and P. D. Killworth, 1978. *Deep-Sea Research* 25: 357-369.
- [6] Deacon G. E. R., 1982. *Deep-Sea Research* 29: 1-16.
- [7] Foster T. D. and E. C. Carmack, 1976. *Deep-Sea Research* 27: 367-381.
- [8] Foster T. D., A. Foldvik and J. H. Middleton, 1987. *Deep-Sea Research* 34: 1 771-1 794.
- [9] Gordon A. L. 1966. *Deep-Sea Research* 13: 1 125-1 138.
- [10] Gordon, A. L. 1971a. *Antarctic Res. Ser.* 15: 205-221.
- [11] Gordon A. L., 1971b. Recent Physical Oceanography Studies of Antarctic Waters. In: Research in the Antarctic, In: L. Quan, editor, Washington D. C. American Association for the Advancement of Science, 609-629.
- [12] Gordon A. L., 1971c. Oceanography of Antarctic Waters.

① 乐肯堂、史久新. 1994. 普里兹湾区混合和环流的若干问题南极研究(已送审)。

- In: Antarctic Oceanography I; Antarctic Research Series, vol. 15, J. L. Reid, editor, American Geophysical Union, 169-203.
- [13] Gordon A. L. and P. Tchernia, 1972. Waters of the continental margin off Adelie Coast, Antarctica. In: D. E. Hayes, editor, Antarctic Oceanography II: The Australian-New Zealand Sector, Antarctic Research Series, vol. 9, American Geophysical Union. 59-69.
- [14] Grigor'ev Y. A., 1967. Circulation of the surface waters in Prydz Bay. Soviet Antarctic Expedition 7: 74-76.
- [15] Hodgkinson R. P., R. S. Colman, K. R. Kerry and M. S. Robb, 1988. Water currents in Prydz Bay, Antarctica, during 1985. Australian National Antarctic Research Expedition Notes. 59: 127.
- [16] Ivanov Y. A., 1963. Океанологические Исследования 3: 30-51.
- [17] Izvekov, M. V., 1959. *Soviet Antarctic Expedition* 2: 91-93.
- [18] Jacobs S. S., A. F. Amos and P. M. Bruchhausen, 1970. *Journal of Geophysical Research*. 17: 935-962.
- [19] Jacobs S. S. and D. T. Georgi, 1977. *Deep Sea Research Supplement* 24: 43-84.
- [20] Jacobs S. S., A. L. Gordon and J. L. Ardai, 1979. *Science*. 203: 439-442.
- [21] Kornilov N. A., 1971. Труды Советской Антарктической Экспедиции. 57: 8-98.
- [22] Middleton J. H. and S. E. Hamphries, 1989. *Deep-Sea Res.* 36(8): 1 255-1 266.
- [23] Mosby H., 1934. The Waters of the Atlantic Antarctic Ocean, Scientific Results of the Norwegian Antarctic Expeditions, 1 927-1 928. Oslo, 1:131.
- [24] Shamoni'yev, 1967. Change in the shape of the West Ice Shelf, Soviet Antarctic Expedition 7: 575-576.
- [25] Smith N. R., Dong Z., K. R. Kerry and S. Wright, 1984. *Deep Sea. Res.* 31(9): 1 121-1 147.
- [26] Tchernia P. and P. F. Jeannin, 1984. *Deep Sea Research* 27: 467-474.
- [27] Zverev, A. A. 1959. Anomalous sea water temperatures in Olaf Prytz Bay, Soviet Antarctic Expedition 1: 269-271.
- [28] Zverev, A. A., 1963. *Soviet Antarctic Expedition* 17: 144-155.
- [29] Денисов А. С. и М. Н. Мызньикова, 1978. Труды Советской Антарктической Экспедиции 68: 100-105.
- [30] Саватюгин Л. М. и В. В. Комова, 1971. Труды Советско й Антарктической Экспедиции 57: 99-104.